昆虫图像分割方法及其应用

王江宁，纪力强*
（中国科学院动物研究所生物多样性信息学研究组，北京 100101）

摘要：昆虫图像自动鉴定是一种快速鉴定昆虫的方法，图像分割则是其中关键步骤。通过搜集和整理国内外近年来针对昆虫图像的分割方法和研究，发现对昆虫图像分割的研究日趋增多。随着计算机图像技术的发展，昆虫图像分割方法吸收了许多图像分割领域中新兴的方法，诸如采用水平集、边缘流以及结合形状、纹理、色彩等多种要素的智能分割（如 JSEG 方法）等。虽然大量的图像分割方法被引入到昆虫图像研究中，但是目前分割技术依然是阻碍昆虫图像广泛应用的关键。本文经过总结和分析，发现目前昆虫图像分割研究的往往在各自的测试集上有良好表现，但是缺乏统一的评价标准，因此很多方法在昆虫图像中应用难以推广。针对研究中的存在的这些问题，需建立良好的昆虫图像分割评价体系，本文建议通过建立统一的昆虫图像库以及对昆虫图像分割的评价方法深入研究，并且这些工作是当前昆虫图像分割研究亟待完善任务。

关键词：昆虫；图像处理；图像分割；图像识别；自动鉴定；形态分类学
中图分类号：Q968　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2011)02-0211-07

Methods of insect image segmentation and their application

WANG Jiang-Ning, JI Li-Qiang* (Research Group of Biodiversity Informatics, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Automatic identification on insect images is a rapid identification method, and image segmentation is a key process in insect image automatic identification. Based on searching and sorting the recent references on insect image segmentation, we found that the researches on insect image segmentation are increasing rapidly. With the development of image processing technology, all kinds of segmentation methods such as level set, edge-flow and JSEG (a segmentation method integrating shape, color and texture information of images) had been tested in insect image segmentation. Although these methods performed well on their own test sets, there is no sharing image dataset or rules to evaluate these methods. It is necessary to build a system to evaluate the increasing insect image segmentation methods. In this review, we suggest creating some standard datasets and doing researches on evaluation of segmentation methods which are desiderated in insect image segmentation.

Key words: Insect; image processing; image segmentation; image recognition; automated identification; morphological taxonomy

1　引言

图像分割是图像处理中的一项关键技术，自 20 世纪 70 年代起一直受到人们的高度重视，至今已提出上千种分割算法。然而，由于尚无通用的分割理论，现提出的分割算法大都是针对具体问题的，并没有一种适合所有图像的通用分割算法（欧阳鑫玉等，2002）。Castleman (1995)将图像分割定义为将数字图像划分成互不相交（不重叠）区域的过程，并认为分割可以通过 3 种不同的原理进行实现：基于区域的分割就是把像素划归到各个物体或区域中；基于边界的分割，只需确定存在区域间的边界；基于边缘的分割，先要确定边缘像素，然后将之连接，构成所需边界。

章毓晋（2001）在其专著中对图像分割方法做了更详尽的介绍，不仅对 Castleman 提出的基本原理基础上常用算法进行了详细介绍，还对一些结合特定的理论工具的分割方法进行了介绍，如：数学形态学、统计模式识别方法、神经网络、模糊集、小波分析、遗传算法等。不同的算法根据其实现的技术还可以分为并行技术和串行技术。此外，书中

作者简介：王江宁，男，1982 年生，博士研究生，主要从事图像模式识别和昆虫分类学的研究，E-mail：wangjn@ioz.ac.cn
* 通讯作者 Corresponding author，E-mail：ji@ioz.ac.cn
收稿日期 Received：2010-03-22；接受日期 Accepted：2011-01-11

还讨论了三维图像、运动图像、深度图像等特殊图像的分割，最后对图像分割的评价方法做了探讨。

早期的图像分割基本以边界、边缘、区域等形状特征作为依据，在这些特征上作阈值分割，近些年来出现了许多综合了彩色、纹理等信息并采用聚类技术的分割技术，如 JSEG（Deng and Manjunath，2001），融合颜色和空间信息的彩色图像分割算法（叶齐祥等，2004）等。

总体来说，图像分割方法是多样的，其发展趋向于使用多种图像特征信息融合和智能化的分割方法。我们通过搜集整理和分析国内外近来用于昆虫图像的分割方法，对这些研究综述如下，以期为昆虫图像分割方法的进一步发展提供参考，同时也明确本领域研究的下一步工作重点。

2 昆虫图像分割方法简介和应用举例

昆虫图像分割是图像分割方法在昆虫图像鉴定中的具体应用，其发展紧随图像分割技术，许多新的图像分割方法很快地就在昆虫图像处理中得到应用。

国外专门对昆虫图像分割方法进行的研究较少，已有的一些典型系统均未对图像分割做专门讨论，如 ABIS（automatic bee identification system）采用了半监督的图像处理和自动识别方法，而 DAISY（digital automated identification system）和 SPIDA（species identification automated）等系统直接提取图像整体（包括背景）提取特征，对图像分割要求较低（MacLeod，2007）。因此，这里主要将近十年来国内外公开发表的相关的研究进行分类列举和简要描述。

2.1 基于灰度直方图的分割

此类分割方法计算简单、速度快，早期研究较多：于新文和沈佐锐（2001）最早针对昆虫数字图像分割技术进行总结和研究，使用棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 的彩色图像的 R，G，B 各通道的灰度图值测试，对 4 种分割技术（简单的直方图分割法，极小误差阈值法，最佳熵阈值法，模糊集合熵法）进行比较，认为模糊集合熵分割算法不但可以正确分割棉铃虫图像，又可以在一定程度上反映出棉铃虫鳞翅上的斑纹特征（图 1）；张红涛等（2003）用灰度图及其二值图的误差，计算其共生矩阵，然后用相对熵的最小阈值法对储粮害虫的图像进行分割尝试，实验中采用了 9 类 12 种粮仓害虫，图像大小为 592 px × 364 px。

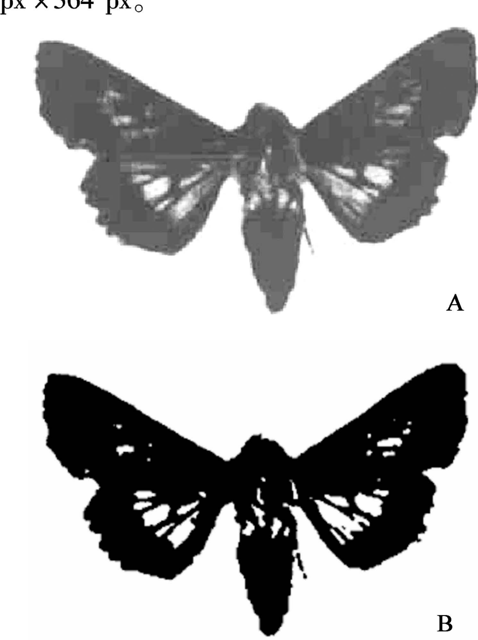


图 1 模糊集合熵分割图像（于新文和沈佐锐，2001）
Fig. 1 Segmentation with the threshold based on fuzzy set entropy（Yu and Shen，2001）
A：增强后的棉铃虫图像 The enhanced grey-level image of *Helicoverpa armigera*；B：分割结果 Result of segmentation.

近来对此类方法的研究常加入一些智能阈值判定方法：罗涛华（2006）使用高斯直方图、矩量保持、模糊集、最小误差 4 种阈值分割方法对储粮害虫图像进行分割。经过比较，认为对于在线采集的储粮害虫图像使用模糊集的分割效果较好。

2.2 基于数学形态学的分割

早期的数学形态学方法被直接用于实验：黄小燕等（2003）提出了用形态模板过滤彩色数字图像的分割方法。从对 15 类 24 种储粮害虫彩色数字的实验中，作者认为形态学方法在对特定情况下的图像上是有效果的。张学庆和刘燕（2004）使用数学形态学对储粮昆虫的灰度图像处理，可以分割出昆虫的足、触角和躯干。

近来基于数学形态学的方法常采用智能阈值计算方法：陈婷婷（2007）将大田采集的彩色图像按照一定规则转成灰度图，然后使用模糊数学形态学（fuzzy mathematical morphology，FMM）进行分割，实验使用了甜菜叶蛾 *Spodoptera exigua* 等 9 类害虫 200 幅图测试，结果正确；熊雪梅等（2007）使用简化脉冲耦合神经网络（pulse coupled neural networks，PCNN）对越北腹露蝗 *Fruhstorferiola tonkinensis* 图像进行分割，认为基于 PCNN 的图像分割效果取决于

PCNN 中各参数的选择，但在图像分割时，各种不同的图像对应的 PCNN 参数是不同的，PCNN 参数的选择是困难的，文章使用两地不同的蝗虫图像两幅作示例。

2.3　基于区域增长的分割

这类方法使用较少，且近期出现一些研究对其结果的描述较模糊:陈月华等(2007)对小麦害虫进行分割的研究，需要先对照片进行分类，然后对害虫的图像进行分割，分割算法采用了典型的区域增长方法；卢亚玲(2007)对储粮粮虫的灰度图进行分割，先对单个样本粮虫的图像用迭代法进行预分割，得到起始阈值，然后利用起始阈值对整幅图像进行迭代分割，最后用连通域面积消去法进行细节处理，这种方法提高了分割的效果和效率；张煜东等(2009)使用了改进分裂合并法(Split-Merge)用于蝗虫图像分割，取得了不错的分割效果，Split-Merge 是一种基于区域的串行图像分割技术，包括分裂与合并两个阶段，思想简单明了，运算效率高。

2.4　基于边缘的分割

基于边缘的分割近来发展迅速，此类方法在测试中结果较好：

王媛媛和彭延军(2007)使用流域(分水岭)方法对灰度图和二值图进行分割。实验使用了 50 幅有米象 *Sitophilus oryzae* 的图像进行测试，成功分割出 163 处粘连的 121 处，有效地分割了粘连昆虫，但存在过度分割现象。

黄世国等(2008)提出快速几何可变形彩色昆虫图像分割算法(fast geometry deformable color image segmentation algorithm，FGDCIS)。FGDCIS 将快速几何可变形模型与彩色边缘检测子相结合后用于昆虫彩色图像分割。实验结果表明该算法能够较好地分割出彩色图像中的昆虫对象。

李小林(2009)提出使用基于边缘流的图像分割算法对昆虫灰度图像进行分割，并用 Matlab 进行仿真(图 2)。基于边缘流的图像分割算法是一种基于边缘的算法，该算法依据边缘流停止的位置来确定图像的边缘。依据昆虫图像的灰度变化，应用边缘流算法不仅可以将昆虫对象区域与其背景区域分割开，而且可以分割出昆虫对象的不同部分。

2.5　基于综合图像信息

此类分割方法多使用图像的纹理、色彩等多种信息，分割时使用较复杂的判定方法，更逼近通用图像分割方法研究，发展较快，效果较好，相关的研究如下：

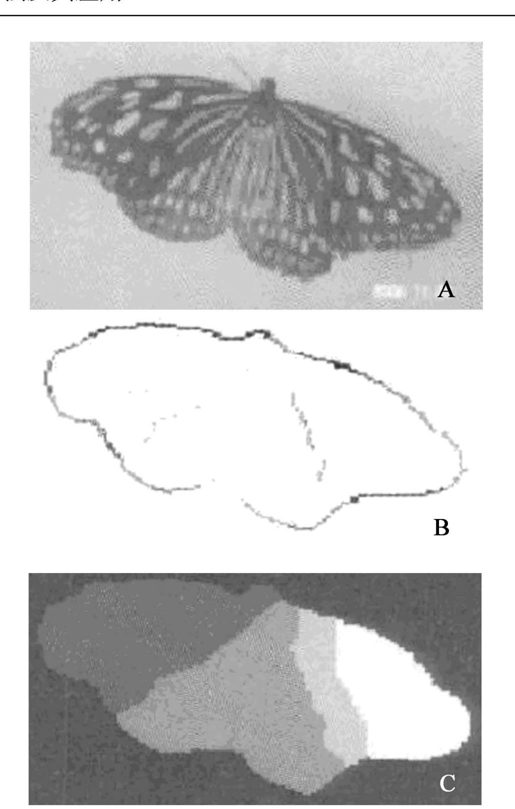
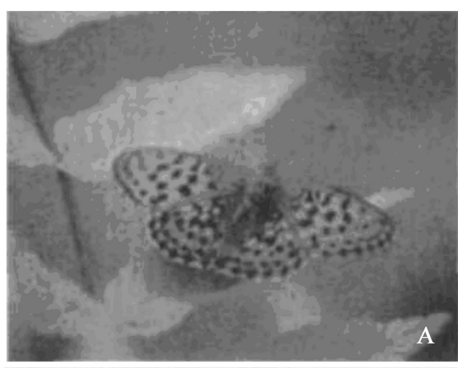


图 2　使用边缘流方法对分割图像（李小林，2009）
Fig. 2　Segmentation with edge-flow method (Li, 2009)
A：原始图像 Original image；B：边缘流计算结果 Result of the edge-flow；C：区域标注结果 Result image with region mark.

赵娟(2007)使用 Gabor 滤波器和支持向量机(support vector machine，SVM)方法，对 3 种储粮害虫，每种 20 幅图像，用 Matlab 进行分割，基本可以把害虫目标与粮食背景区分开。

刘晓静等(2008)使用 JSEG 方法对有复杂背景的彩色昆虫图像分割，取得较好效果(图 3)。JSEG 是一种全自动的彩色图像分割算法，利用区域之间的邻接和相似性进行区域生长和区域合并，它在确定了初始分割区域后，采用全局最优化的规则进行区域生长，然后使用基于闭值的区域合并完成图像分割。

程小梅等(2009)将多特征的 EM (expectation maximum)算法对昆虫图像进行分割，EM 方法的基本思想是:首先对图像的每一个像素点进行颜色、纹理等特征的抽取；然后采用高斯混合模型，通过 EM 算法估计高斯混合模型的参数，将图像像素点依据其特征的相似度粗略地划分为不同的组并给予标记；最后在各个组内利用其位置信息对像素点进一步进行划分，得到图像的区域分割。实验选取了蝽科、凤蝶科、枯叶蛾科、天牛科等 10 多类昆虫图



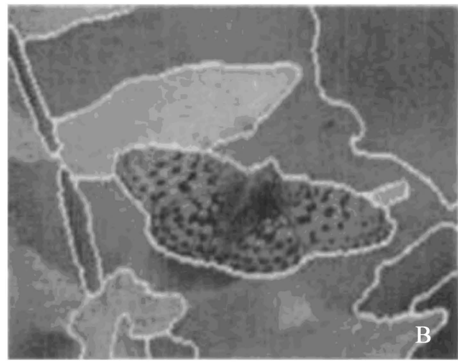


图 3 使用 JSEG 方法分割图像（刘晓静等，2008）
Fig. 3 Segmentation with JSEG method（Liu *et al*., 2008）
A：原始图像 Original image；B：分割结果图像 Result image of the JSEG.

像作为数据来源，图像大小均为 192 px × 128 px。

党培和谭联（2009）使用阈值分割、区域生长、数学形态学、模糊 C 均值聚类（fuzzy c-mean，FCM）和最小二乘支持向量机相结合的粮虫图像分割算法。实验对常见的 5 种鞘翅目储粮害虫（每种各 30 个样本）进行测试，得到了很好的效果。

3 我国昆虫图像分割方法现状分析

表 1 列举了在国内学术杂志上公开发表的部分相关研究及其所用方法（未含相关学位论文）。

对已发表的研究经过分析可发现目前昆虫分割的研究有如下一些特点：

（1）表 1 所列文献按照发表时间排序，可明显看出近来关于昆虫图像分割的研究论文数量成上升趋势，说明昆虫图像分割的研究在我国逐渐受到重视。

（2）在图像的类型上，早期研究以灰度图研究较多，近年来对彩色图像分割的研究得到了迅速发展；早期研究也多使用标本图像，后来对粮虫的的生态图像研究增多，现在各种生态图像的研究都在开展中。这些变化是数字图像处理研究的发展是相关的，同时也说明了昆虫图像分割技术在向实际应用接近。

（3）在分割方法上，早期研究多集中于阈值分割方法，后来对数学形态学方法（包括流域法等）研究较多；近来使用的方法呈多元化，也更智能化，尤其是 Split-Merge（张煜东等，2009）、PCNN（熊雪梅等，2007）、JSEG（刘晓静等，2008）、FGDCIS（黄世国等，2008）等方法的尝试，为复杂背景的昆虫分割提供了更有效的思路，大大扩展了昆虫图像分割的智能性和应用范围。

（4）目前昆虫分割研究集中在 3 个方向：昆虫个体和背景的分割，昆虫本身躯干和肢体的分割，昆虫个体之间的分割。这几个方向和昆虫图像的应用紧密相连：昆虫个体和背景的分割是图像预处理的重要环节，应用较广，目前讨论也最多；昆虫个体之间的分割多见于昆虫图像计数的应用中，目的是从包含多头昆虫个体的图像中分割出昆虫个体，进行计数，此方法在储粮害虫的研究中讨论较多；昆虫躯干和肢体的分割多应用于昆虫的形态学分析和精确鉴定等，此类报道较少，仅见黄小燕等（2003）、张学庆和刘燕（2004）使用形态学的方法可以对昆虫图像进行肢体级别的分割。

（5）从研究对象的昆虫种类来看，所选昆虫图像的种类也集中于鳞翅目（蛾类和蝴蝶）和鞘翅目（多为储粮昆虫），偶见直翅目，对于其他昆虫研究很少。鳞翅目和鞘翅目昆虫和人类生产生活密切相关的，因此研究较多。从时间轴上看，研究的昆虫类群近来在不断扩大。

总体来说，当前的昆虫图像分割使用的方法呈多样化，研究范围和深度均在不断扩增。

4 存在的问题

上文中列举的图像分割的算法在相应的场合均有较好效果，但是总体看来，目前的昆虫图像分割研究仍然存在很大的问题：

目前多数研究是将在某些领域中较成熟的图像分割算法直接或稍加改进后，然后在较小的测试集甚至某张图像上进行仿真测试，很少对大样本的图像做测试，在这样的测试集上不能充分说明方法的可行性。部分研究对于试验图像的来源和拍摄规范也没有阐述清晰，这样的试验结果不足说明分割算法在实际应用中的鲁棒性（robustness）。综上所述，目前昆虫图像分割研究需要一个统一的、有一定数据规模的测试集，以客观地衡量新算法的各项性能。

表 1　国内昆虫图像分割方法研究主要信息统计表

Table 1　Recent domestic researches on segmentation about insect images

分割方法 Segmentation methods	图像类型 Image type	适用领域 Application field	实验对象 Target insects	参考文献 References
简单的直方图分析、极小误差阈值、最佳熵自动阈值、最小模糊熵 Image histogram, threshold based on optimal entropy, threshold based on fuzzy set entropy and threshold based on minimal fuzzy entropy	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	棉铃虫标本 Specimens of *Helicoverpa armigera*	于新文和沈佐锐(2001)
数学形态学 Mathematic morphology	彩色图 Color image	肢体分割 Part segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	黄小燕等(2003)
相对熵阈值法 Relative entropy threshold	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	张红涛等(2003)
数学形态学 Mathematic morphology	灰度图 Grey-scale image	肢体分割 Part segmentation	储粮昆虫 Stored-grain pests	张学庆和刘燕(2004)
阈值分割 Threshold	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	罗涛华(2006)
Gabor 波和支持向量机 Gabor and SVM	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	粮虫 Stored-grain pests	赵娟(2007)
流域法 Watershed	二值图 Binary image	个体分割 Individual segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	王媛媛和彭延军(2007)
区域增长 Region growing	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	麦田害虫 Pests from wheat	陈月华等(2007)
脉冲神经网络 PCNN	二值图 Binary image	背景分割 Background segmentation	蝗虫 *Fruhstorferiola tonkinensis*	熊雪梅等(2007)
迭代法和连通域 Iterative and connected region	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	卢亚玲(2007)
模糊数学形态学 FMM	彩色图 Color image	背景分割 Background segmentation	大田害虫 Field pests	陈婷婷(2007)
快速几何可变形彩色图像分割算法 FGDCIS	彩色图 Color image	背景分割 Background segmentation	鳞翅目 Lepidoptera	黄世国等(2008)
JSEG	彩色图 Color image	背景分割 Background segmentation	蝴蝶 Butterflies	刘晓静等(2008)
多特征的 EM 算法 EM using multi-features	彩色图 Color image	背景分割 Background segmentation	储粮害虫（鳞翅目） Stored-grain pests (Lepidoptera)	程小梅等(2009)
模糊 C 均值聚类 FCM	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	储粮害虫 Stored-grain pests	党培和谭联(2009)
改进 Split-Merge 法 Improved split-merge	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	蝗虫 Locusts	张煜东等(2009)
边缘流 Edge-flow	灰度图 Grey-scale image	背景分割 Background segmentation	蝴蝶 Butterflies	李小林(2009)

目前对于昆虫图像分割结果评价的相关研究很少，多数已有文献是通过和其他方法比较来展示新算法的优越性，但是比较的算法本身的性能就没有评价的标准，因此目前研究对于结果评价比较主观、缺乏统一标准。于新文和沈佐锐(2001)提到了关于图像分割的评价，但是没有给出合适的方法；熊雪梅等(2007)提到一个方法，即用机器分割的正确像素和手动分割的正确像素作比较，其比值作为测定分割结果，这种方法较精准，实现简单，但是主观性强。

5 建议和展望

虽然昆虫图像分割在目前的昆虫图像处理研究中已经占了较大比重，但昆虫图像分割的研究仍处于起步阶段。通过总结可以发现，这一阶段的昆虫图像分割研究还需要在以下方面继续深入：

（1）结合昆虫特点设计分割算法。昆虫纲的物种繁多，分布广泛，人类对昆虫的研究甚多，因此昆虫的照片来源五花八门，情况十分复杂。这样我们需要针对不同的应用进行相应的分割算法设计，例如:昆虫标本图像的鉴定和昆虫生态图像的鉴定所需要的分割算法是截然不同的，因为前者背景通常较为单纯，易于分割，而后者背景通常较复杂，目前较难完全使用计算机自动分割。

图像分割技术发展很快，各种新的方法层出不穷(Pal and Pal，1993)，总体上看来，目前新的图像分割方法多是基础的分割方法和机器学习的新方法相结合，或者是和特定的应用领域相结合而产生。我们需要及时关注相关的新方法，考虑将之用于昆虫图像的分割中，但同时也要看到:新的方法也许就会从传统方法和昆虫应用领域结合中产生。另外还须注意，即便是昆虫图像分割，也因为应用不同，而会导致分割方法不同，因此多数新方法是适合特定应用的。

（2）建立昆虫标准图像测试集。标准图像集需要考虑到昆虫图像的实际情况，包括各种应用、可能情况等。目前的研究中有些测试数据集合的数据质量较好，可以进行推广，如中国农业大学的 BugVisux 使用的数据集合，包括 8 目 40 种昆虫的图像(赵汗青等，2003)；DASIY 系统中提到的英国皇家植物园的鳞翅目活体图像集合，包括 35 种蛾类(Watson *et al*.，2004)。另外，中国农业大学农业数字博物馆、台湾大学数位典藏(Shiao，2006)等网络数据库中的一些图像也可以作为测试的图像集合。

测试集除了包含原始图像，还应给出经专家认证后的手工分割结果图的集合，为建立昆虫图像分割评价体系奠定基础。目前此这方面的工作开展较少，其重点在于手工分割的工作量较大，且需要相关专家的认定。

（3）建立昆虫图像分割评价体系。此目标以建立昆虫图像分割的测试集为基础，按照应用对各种分割方法提出一致的评价标准。关于具体的评价方法，即便是图像处理研究中也都尚有争议，常用的方法可以参考《图像分割》(章毓晋，2001)。对于昆虫图像分割的评价来说，主要是对图像的分割结果、分割速度等方面进行评价，具体评价的标准制定还需深入研究。

昆虫图像分割是昆虫图像应用过程的重点和难点所在。只有将昆虫图像很好地分割，才能进行计数、鉴定等更实际的应用，所以昆虫图像分割研究水平的高低决定了昆虫图像应用的前景。随着数字图像处理、机器视觉、人工智能等计算机技术的发展，昆虫图像分割也会得到更深入的研究。

参 考 文 献 (References)

Castleman KR, 1996. Digital Image Processing. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River.

Chen TT, 2007. Pest image segmentation in field with fuzzy morphology. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, (6): 45－47. [陈婷婷, 2007. 采用模糊形态学的大田害虫图像分割. 内蒙古农业科技, (6): 45－47]

Chen XM, Geng GH, Zhou MQ, Huang SG, 2009. Applying expectation-maximization in insect image segmentation using multi-features. *Computer Applications and Software*, 26(2): 20－22. [程小梅, 耿国华, 周明全, 黄世国, 2009. 基于多特征的 EM 算法在昆虫图像分割中的应用. 计算机应用与软件, 26(2): 20－22]

Chen YH, Hu XG, Zhang CL, 2007. Algorithm for segmentation of insect pest images from wheat leaves based on machine vision. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 23(12): 187－191. [陈月华, 胡晓光, 张长利, 2007. 基于机器视觉的小麦害虫分割算法研究. 农业工程学报, 23(12): 187－191]

Dang P, Tan L, 2009. A new stored-product pests recognition algorithm based on FCM and LS-SVM. *Computer Development & Applications*, 22(10): 7－9. [党培, 谭联, 2009. FCM 和 LS-SVM 相结合的粮虫图像分割算法. 电脑开发与应用, 22(10): 7－9]

Deng YN, Manjunath BS, 2001. Unsupervised segmentation of color-texture regions in images and video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(8): 800－810.

Huang SG, Zhou MQ, Geng GH, 2008. Fast geometry deformable

insect' s color image segmentation algorithm. *Journal of Computer Applications*, 28(12): 3144 -3146. ［黄世国，周明全，耿国华，2008. 快速几何可变形彩色昆虫图像分割算法. 计算机应用，28(12): 3144 -3146］

Huang XY, Guo Y, Zhao TF, 2003. Segmentation method based on mathematical morphology for colorized digital image of vermin in cropper foodstuff. *Computer Measurement & Control*, 11(6): 467 -469. ［黄小燕，郭勇，赵太飞，2003. 数学形态学的储粮害虫彩色数字图像分割. 计算机测量与控制，11(6): 467 -469］

Li XL, 2009. Edge flow-based image segmentation and its application. *Journal of Minjiang University*, 30(2): 68 -71. ［李小林，2009. 一种基于边缘流的图像分割算法及其应用. 闽江学院学报，30(2): 68 -71］

Liu XJ, Geng GH, Zhou MQ, Huo QS, 2008. A natural insects color image segmentation algorithm. *Computer Applications and Software*, 25(11): 37 -38. ［刘晓静，耿国华，周明全，霍青松，2008. 一种基于复杂背景下的昆虫彩色图像分割方法. 计算机应用与软件，25(11): 37 -38］

Lu YL, 2007. Segmentation algorithm of grain insect image based on iterative threshold and interconnected domain. *Journal of Hubei University of Technology*, 22(6): 14 -16. ［卢亚玲，2007. 基于迭代法和连通域的储粮图像粮虫分割算法. 湖北工业大学学报，22(6): 14 -16］

Luo TH, 2006. Investigation on image threshold segmentation method of pests in stored grain. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 25(1): 5 -8. ［罗涛华，2006. 基于自适应阈值的储粮害虫图像分割算法. 武汉工业学院学报，25(1): 5 -8］

MacLeod N, 2007. Automated Taxon Identification in Systematics: Theory, Approaches and Applications. CRC Press, Boca Raton.

Ouyang XY, Zhao NN, Song L, Xie YD, 2002. Survey on image segmentation. *Journal of Anshan Institute of Iron and Steel Technology*, 25(5): 363 -368. ［欧阳鑫玉，赵楠楠，宋蕾，谢元旦，2002. 图像分割技术的发展. 鞍山钢铁学院学报，25(5): 363 -368］

Pal NR, Pal SK, 1993. A review on image segmentation techniques. *Pattern Recognition*, 26(9): 1277 -1294.

Shiao SF, 2006. Insect Museum Digital Archives Project. Department of Entomology, National Taiwan University. ［2010-04-16］. http://www.imdap.entomol.ntu.edu.tw/

Wang YY, Peng YJ, 2007. Application of watershed algorithm in image of food insects. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 26(2): 79 -82. ［王媛媛，彭延军，2007. 流域分割方法在储粮昆虫图像中的应用. 山东科技大学学报(自然科学版)，26(2): 79 -82］

Watson AT, O' Neill MA, Kitching IJ, 2004. Automated identification of live moths (macrolepidoptera) using Digital Automated Identification System (DAISY). *Systematics and Biodiversity*, 1(3): 287 -300.

Xiong XM, Wang YM, Zhang XC, Zheng YJ, 2007. Image binary segmentation based on pulse-coupled neural network for the locust detection system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 38(10): 84 -86. ［熊雪梅，王一鸣，张小超，郑永军，2007. 基于简化脉冲耦合神经网络的蝗虫图像二值分割. 农业机械学报，38(10): 84 -86］

Ye QX, Gao W, Wang WQ, Huang TJ, 2004. A color image segmentation algorithm by using color and spatial information. *Journal of Software*, 15(4): 522 -530. ［叶齐祥，高文，王伟强，黄铁军，2004. 一种融合颜色和空间信息的彩色图像分割算法. 软件学报，15(4): 522 -530］

Yu XW, Shen ZR, 2001. Segmentation technology for digital image of insects. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 17(3): 137 -141. ［于新文，沈佐锐，2001. 昆虫数字图像的分割技术研究. 农业工程学报，17(3): 137 -141］

Zhang HT, Hu YX, Qiu DY, 2003. The stored-grain pest image segmentation algorithm based on the relative entropy threshold. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 24(3): 27 -29. ［张红涛，胡玉霞，邱道尹，2003. 基于相对熵阈值法的储粮害虫图像分割. 华北水利水电学院学报，24(3): 27 -29］

Zhang XQ, Liu Y, 2004. Application of mathmetics porphilogy on the image segmentation and modelrecognition of stored food beetle. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 23(1): 94 -96. ［张学庆，刘燕，2004. 数学形态学在储粮昆虫图像识别中的应用. 武汉工业学院学报，23(1): 94 -96］

Zhang YD, Wu LN, Wei G, Wu HQ, 2009. Improved split-merge segmentation used for locust image. *Computer Engineering and Applications*, 45(14): 34 -38. ［张煜东，吴乐南，韦钢，吴含前，2009. 改进 Split-Merge 分割用于蝗虫图像. 计算机工程与应用，45(14): 34 -38］

Zhang YJ, 2001. Image Segmentation. Science Press, Beijing. ［章毓晋，2001. 图像分割. 北京：科学出版社］

Zhao HQ, Shen ZR, Yu XW, 2003. Use of math-morphological features in insect taxonomy. Ⅰ. At the order level. *Acta Entomologica Sinica*, 46(1): 45 -50. ［赵汗青，沈佐锐，于新文，2003. 数学形态学在昆虫分类学上的应用研究. Ⅰ. 在目级阶元上的应用研究. 昆虫学报，46(1): 45 -50］

Zhao J, 2007. Image segmentation of pests in stored-grain based on Gabor wavelet and support vector machines. *Computer and Information Technology*, 15(3): 37 -39. ［赵娟，2007. 基于 Gabor 小波和支持向量机的储粮害虫图像分割. 电脑与信息技术，15(3): 37 -39］

（责任编辑：袁德成）